



文章栏目：水污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201912103

中图分类号 X703.1

文献标识码 A

蒋柱武, 王晟, 魏忠庆, 等. 中试规模动力波吹脱技术分离老龄化垃圾渗滤液中的高浓度氨氮[J]. 环境工程学报, 2020, 14(11): 3042-3052.

JIANG Zhuwu, WANG Sheng, WEI Zhongqing, et al. Separation of high concentration ammonia nitrogen from aged-landfill leachate by pilot-scale dynamic wave stripping[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(11): 3042-3052.

## 中试规模动力波吹脱技术分离老龄化垃圾渗滤液中的高浓度氨氮

蒋柱武<sup>1,\*</sup>, 王晟<sup>1</sup>, 魏忠庆<sup>2</sup>, 肖友淦<sup>2</sup>, 李林<sup>2</sup>, 颜丽红<sup>1</sup>, 陈礼洪<sup>1</sup>, 裴炎炎<sup>1</sup>

1. 福建工程学院生态环境与城市建设学院, 福州 350118

2. 福州城建设计研究院有限公司, 福州 350118

第一作者: 蒋柱武(1974—), 男, 博士, 教授。研究方向: 水污染控制与资源化。E-mail: [jiangzhuwu@126.com](mailto:jiangzhuwu@126.com)

\*通信作者

**摘要** 为解决老龄化垃圾渗滤液的脱氮难题, 采用动力波吹脱技术对老龄化垃圾渗滤液进行氨氮吹脱分离, 探究了吹脱时间、pH、气液比、温度和进水氨氮浓度对吹脱效能的影响。单因素实验结果表明: 前 3 h 吹脱去除率增长最快, 5 h 后吹脱去除率变化较小; 高 pH 下游离氨占比增大, 对吹脱更为有利, pH 为 10.5 左右时的工艺最为经济; 动力波吹脱适用温度范围广, 在 10 °C 和 25 °C 时, 去除率可达 72.62% 和 90.68%; 增加气液比可提高吹脱效率, 但当气液比超过 129 后, 吹脱效果增幅不明显; 氨氮浓度对吹脱去除率的影响较小。正交实验结果显示: 温度方差最大, pH、气液比方差次之, 进水氨氮浓度方差最小, 即表明温度对动力波吹脱脱氮影响最为显著; pH、气液比也是重要影响因素; 初始氨氮浓度对吹脱效率影响不显著。在 25 °C、pH=10.5、气液比为 129 时, 吹脱 5 h 的最优条件下, 氨氮去除率约 91.25%~94.15%。相比传统吹脱工艺, 动力波吹脱技术能大幅提高氨氮分离效率。

**关键词** 老龄化垃圾渗滤液; 氨氮; 脱氮; 动力波; 吹脱

垃圾在堆放和填埋过程中经历发酵、雨水冲刷、淋溶和地表水及地下水浸泡等过程, 会产生大量的垃圾渗滤液<sup>[1]</sup>, 其氨氮浓度会随填埋龄延长而逐年增高。老龄化垃圾渗滤液为典型的高氨氮、低 C/N 比废水<sup>[2-3]</sup>, 对其进行高效脱氮处理是亟需攻克的难题。

对氨氮废水的处理, 一般需要物化法与生物法<sup>[4]</sup>的紧密结合。常见的物化脱氮方法主要有吸附法<sup>[5]</sup>、离子交换法<sup>[6]</sup>、折点氯化法<sup>[7]</sup>、化学沉淀法(又称磷酸铵镁(magnesium ammonium phosphate)沉淀法, 简称 MAP 法)<sup>[8]</sup>等。这些方法大多只适合中低浓度氨氮废水的处理, 对高氨氮垃圾渗滤液而言, 即使加大吸附剂、交换树脂使用剂量或化学药剂投加量, 也难以达到理想效果, 出水氨氮仍然很高, 导致后续生物脱氮压力极大, 无法解决脱氮难题。传统吹脱法由于水气界面作用不充分, 氨逸出速率低及设备易结垢的问题, 导致吹脱效率不高, 分离效果差<sup>[9-10]</sup>。目前, 在实践中广泛采用的“双膜”<sup>[11]</sup>处理工艺, 由于维护费用和浓缩液处理的问题, 受到业界诸多诟病。

收稿日期: 2019-12-17; 录用日期: 2020-05-09

基金项目: 福建省建设科技研究开发项目(GY-H-17010); 国家自然科学基金资助项目(51878171)

动力波 (dynawave) 洗涤装置是美国杜邦公司于 20 世纪 70 年代开发的一种高效分离专利技术, 主要应用于废酸回收、冶炼烟气处理、硫酸净化、粉煤锅炉尾气处理等 40 多个不同生产领域<sup>[12]</sup>。本课题组以老龄化垃圾渗滤液为处理对象, 研究利用动力波泡沫区气液两相接触面积大且接触表面不断迅速更新的极大优势, 对垃圾渗滤液进行氨分离, 为后续生化处理创造有利条件。本研究探讨吹脱时间、pH、气液比、温度、进水氨氮浓度等多种因素对氨氮吹脱效能的影响, 在单因素实验的基础上, 通过正交实验考察最优工艺条件, 为垃圾渗滤液中氨氮的高效分离提供创新方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 废水来源与水质

实验用水取自福州市红庙岭垃圾渗滤液厂均衡池, 具体水质情况: pH 为 7.8~8.7, 温度 10~30 ℃, 总氮浓度为 800~1 200 mg·L<sup>-1</sup>, 其中氨氮的浓度为 500~1 000 mg·L<sup>-1</sup>、BOD<sub>5</sub> 和 COD 的浓度分别为 300~600、2 000~4 000 mg·L<sup>-1</sup>。该渗滤液氨氮占总氮 60%~85%, 高效分离氨氮可大大降低总氮含量, 为后续生物处理创造良好条件并节约脱氮成本。

### 1.2 实验试剂与仪器

实验所用试剂有氢氧化钠 (NaOH)、酒石酸钾钠 (KNaC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>·4H<sub>2</sub>O)、碘化汞 (HgI<sub>2</sub>)、碘化钾 (KI)、碱性过硫酸钾 (K<sub>2</sub>O<sub>8</sub>S<sub>2</sub>)、盐酸 (HCl)。主要仪器有高压蒸汽灭菌锅、雷磁 pHS-3C 型 pH 计、HACH COD 消解器、HACH 便携式多参数比色计、HACH 生化需氧量分析仪等。

### 1.3 实验装置

动力波吹脱中试实验装置如图 1 所示。其中, 调节池 (尺寸: 50 cm×20 cm×40 cm=40 L)、反应循环箱体 (尺寸: 90 cm×30 cm×40 cm=108 L), 箱体采用 PP 材质, 一次吹脱处理水量为 42 L。

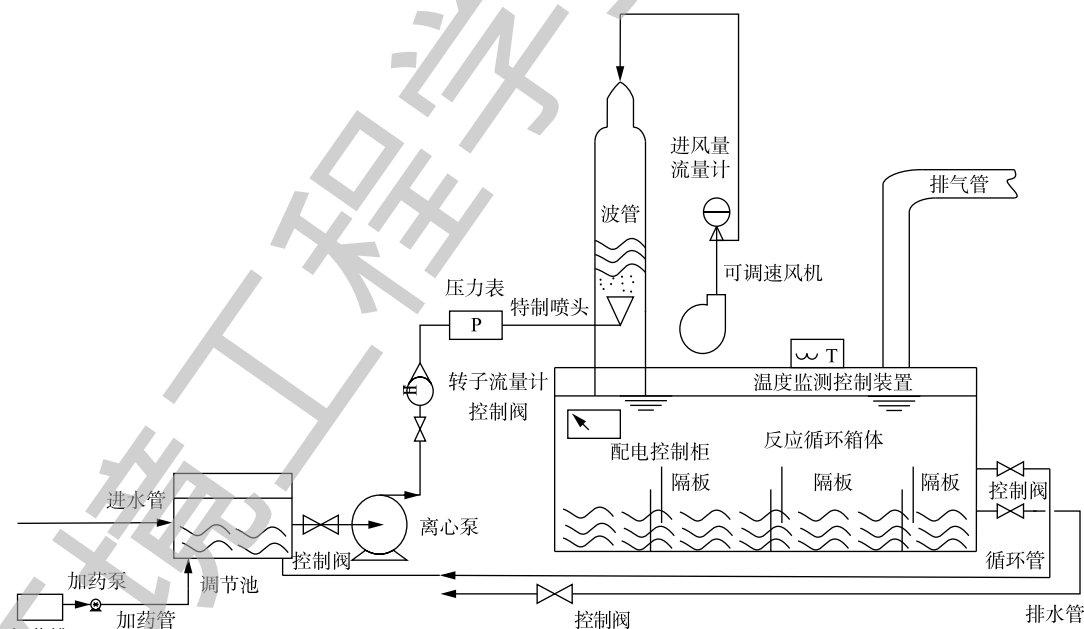


图 1 动力波吹脱中试研究装置

Fig. 1 Pilot equipment for dynamic wave stripping

中试实验流程: 1) 将渗滤液加入调节池内, 调节 pH 和温度; 2) 开启可调速风机, 改变风机气量, 控制气液比, 并启动污水离心泵, 即可进行吹脱实验; 3) 风机将空气自动力波反应器的上方鼓入, 垃圾渗滤液由离心泵经转子流量计自下而上, 由特制的喷头呈幅射状旋流射入动力波吹脱

装置的波管中；4) 动力波吹脱后的液体流入反应循环箱体，在箱体中安装隔板，强化水力搅拌；5) 在箱体中强化搅拌后的液体经循环管道再次由污水离心泵送至动力波装置进行循环吹脱；6) 实验中，定时从排水管取样检测，以研究不同因素对吹脱效果的影响。

#### 1.4 分析方法

pH 采用雷磁 pH-3C 型 pH 计现场检测，温度在监测控制装置上直接读取。COD 采用快速消解分光光度法<sup>[13]</sup>，用 HACH DR900 仪器测量；BOD<sub>5</sub> 采用稀释与接种法<sup>[14]</sup>用 HACH BODTrakTM II 生化需氧量分析仪测量；TN 和氨氮浓度按照国标法<sup>[15-16]</sup>进行检测。

## 2 结果与讨论

### 2.1 吹脱时间对氨氮吹脱效能的影响

调节废水温度为 30 ℃，气液比为 129:1，pH 为 10.5，在不同的时间间隔取样，检测氨氮的浓度，结果见图 2。垃圾渗滤液氨氮浓度随吹脱时间的增加而降低，前 3 h 为吹脱的高效段，氨氮去除率高达 90% 以上，当吹脱时间到 5 h 时，氨氮浓度由 950.10 mg·L<sup>-1</sup> 降至 55.60 mg·L<sup>-1</sup>，吹脱 7 h 后，氨氮浓度为 42.63 mg·L<sup>-1</sup>。到吹脱后期，随着时间的延长，氨氮的脱除效果并无显著变化。这是由于此时废水中氨氮浓度已经非常低，要将离子态的铵 (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) 转换为游离态的氨 (NH<sub>3</sub>)，需要更为理想的条件，但这会导致吹脱成本增加。综合考虑，动力波吹脱时间控制在 5 h。

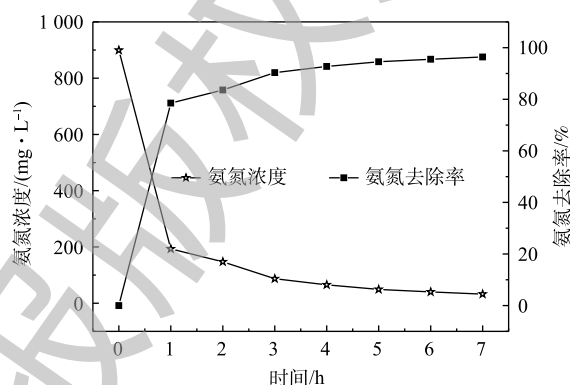


图 2 氨氮吹脱效能随时间的变化

Fig. 2 Variation of ammonia nitrogen stripping efficiency with time

### 2.2 pH 对氨氮吹脱效能的影响

调节废水温度为 25 ℃，气液比为 129:1，废水 pH 分别为 8.0、9.0、10.0、10.5、11.0、12.0 时，测定吹脱 5 h 后废水氨氮的浓度，结果如图 3 所示。氨氮吹脱效率随 pH 增大而升高，是因废水中 NH<sub>3</sub>-N 的吹脱去除效果与废水中游离氨 NH<sub>3</sub> 和铵离子 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 有关，pH 增加使得 NH<sub>3</sub> 的含量越

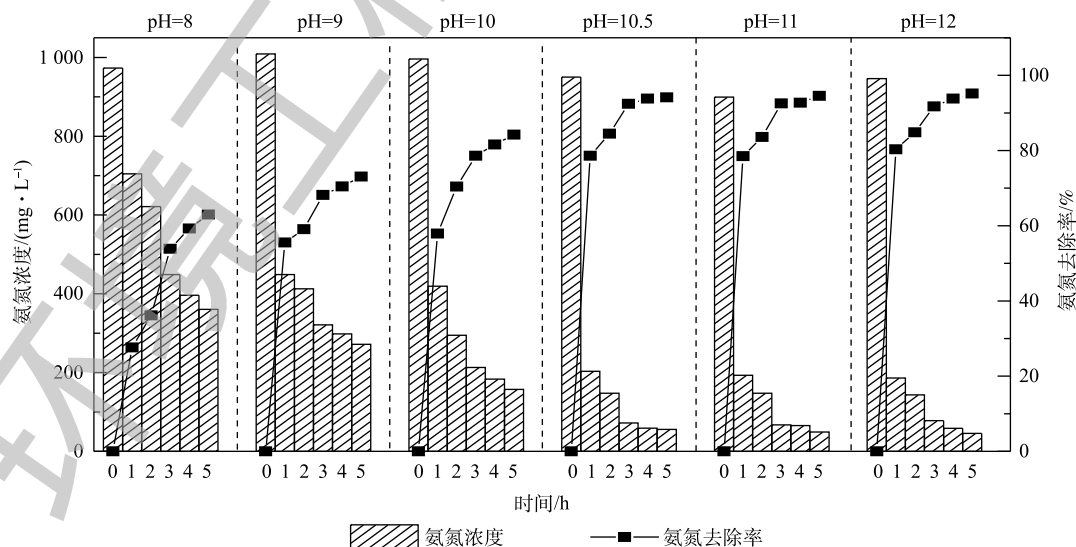


图 3 pH 对氨氮吹脱效能的影响

Fig. 3 Effect of pH on ammonia nitrogen stripping efficiency

高，吹脱效果越好。废水中  $\text{NH}_3$  和  $\text{NH}_4^+$  间的平衡关系为： $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- = \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ，保持其他条件不变，当渗滤液的初始  $\text{pH} \leq 9.0$  时，渗滤液含有大量的  $\text{NH}_4^+$ ， $\text{NH}_4^+$  有较强的缓冲作用，吹脱时氨逸出量很小，此时吹脱效果不理想， $\text{pH}=8.0$  时吹脱去除率仅为 70% 左右， $\text{pH}=9.0$  时吹脱去除率也只有 80% 左右；当  $\text{pH} > 9.0$  时，氨的电离平衡被打破，平衡向着转化为游离氨方向变动， $\text{NH}_3$  浓度增加，吹脱过程容易进行<sup>[17]</sup>，吹脱去除率达 90% 以上。虽然废水  $\text{pH}$  升高平衡向右移动，氨氮吹脱效果越好，但调节  $\text{pH}$  大于 10.5，污水中的氨氮以  $\text{NH}_3$  形式为主，此时，提高  $\text{pH}$  仅增加少量  $\text{NH}_3$ 。考虑到碱投加量会导致成本升高，在实际工程应用中， $\text{pH}$  调节为 10.5 左右最为经济。

### 2.3 气液比对氨氮吹脱效能的影响

调节废水温度为 25 °C， $\text{pH}$  为 10.5，进水量为  $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，控制气量分别为 35、75、155、195 和  $270 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  (即对应气液比为 29、62、129、163 和 225)，检测吹脱 5 h 后出水氨氮的浓度，实验结果如图 4 所示。垃圾渗滤液氨氮浓度随气液比的增大而下降，当气液比为 129，吹脱 5 h 后，氨氮浓度由  $817.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降低至  $62.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，氨氮去除率达 92.34%，若继续增加气液比至 225，相较于气液比为 129 时去除率仅增加 2.18%。表明气液比高于 129 时，氨氮的去除率呈缓慢增长趋势，这是因为在气液比为 129 左右时，动力波吹脱洗涤管中即可形成稳定泡沫区，在泡沫区，空气与水的比表面积增加，气泡的破裂和更新导致了气相界面面积的增加。动力波吹脱过程中所形成泡沫区气泡的大小会影响  $\text{NH}_3$  的转移速率， $\text{NH}_3$  在较大气泡中的传质速度较慢，气液比低于 129 时，动力波吹脱泡沫区气泡较大，吹脱去除率较低；气液比大于或等于 129 时，形成较为理想的泡沫区，有利于  $\text{NH}_3$  在液相和气相之间的传质<sup>[18]</sup>。考虑到实际应用时的能耗问题，气液比控制在 129 较为理想。

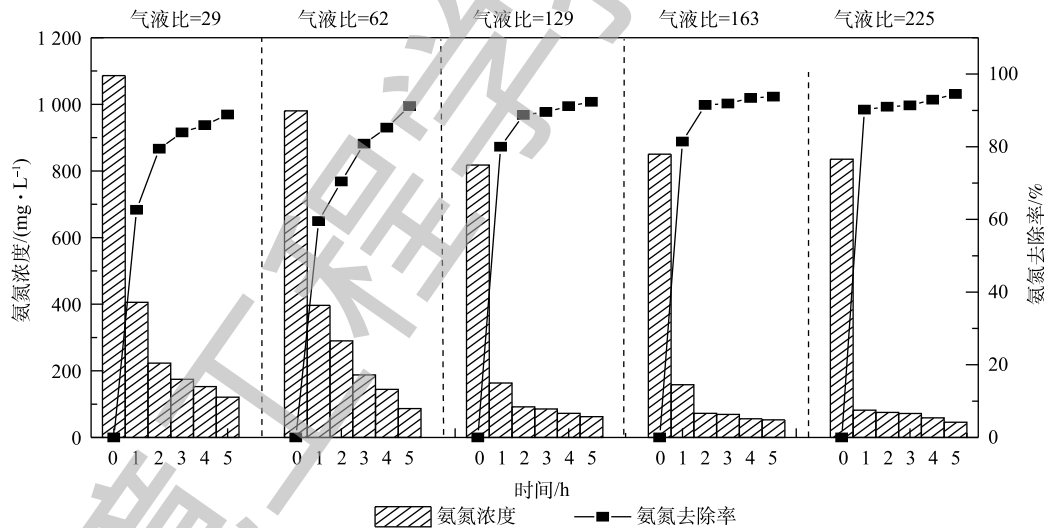


图 4 气液比对氨氮吹脱效能的影响

Fig. 4 Effect of different ratios of gas/liquid on ammonia nitrogen stripping efficiency

### 2.4 温度对氨氮吹脱效能的影响

调节废水  $\text{pH}$  为 10.5，液气比为 129，进水量为  $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ，在温度分别为 10、15、20、25、30 和 35 °C 时，检测吹脱 5 h 后出水氨氮的浓度，结果见图 5。由图 5 可知，垃圾渗滤液中氨氮的去除率随温度的升高而持续升高。当温度为 10、25 和 35 °C 时，废水的氨氮吹脱去除率分别为 72.62%、91.25% 和 96.03%，可见废水温度对氨氮的脱除影响大。这是因为当温度升高时，游离氨的含量也不断增大，分子扩散快，传质系数增大<sup>[19]</sup>；另外，在一定压力下，温度升高使氨的平衡分压增加，降低了氨在废水中的溶解度，有利于氨气的析出。从节约成本的角度综合考虑，吹脱

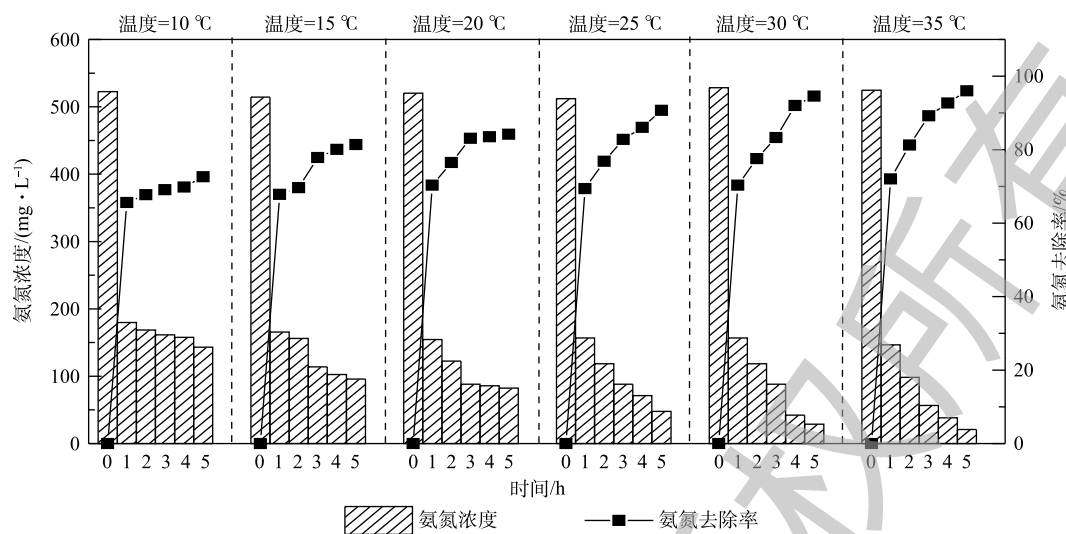


图5 温度对氨氮吹脱效能的影响

Fig. 5 Effect of different ratios of temperature on ammonia nitrogen stripping efficiency

温度为 25 °C 较为理想。在实际工程应用中,因冬季气温比较低,往往吹脱效果不佳,一般会在吹脱处理前对垃圾渗滤液进行加热升温。根据本研究的结果,采用动力波吹脱装置预处理脱氨,即使在低温条件下也能实现较高的氨氮去除率。废水温度为 10 °C 时,吹脱去除率高达 70% 以上,相比于传统的吹脱方式具有较大优势。

### 2.5 进水氨氮浓度对吹脱效能的影响

调节废水温度为 25 °C, pH 为 10.5, 液气比为 129, 进水量为  $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  时,在渗滤液初始浓度(由于渗滤液水质变化大,不同批次的水样氨氮浓度不同,实验中将不同批次水样进行混合的方式得到不同氨氮浓度的渗滤液)分别为 512.13、632.46、749.21、822.30、900.10 和 995.97  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,检测吹脱 5 h 后出水氨氮的浓度,实验结果如图 6 所示。由图 6 可知,在初始氨氮浓度为 500~1 000  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  的情况下,保持温度、pH、气液比和进水量不变,吹脱 5 h 后氨氮的去除率均为 90%~92%,这表明氨氮吹脱效率与垃圾渗滤液中初始氨氮浓度关系不大。

### 2.6 正交分析

为比较 pH、温度、气液比和进水氨氮浓度 4 个因素对吹脱效果影响的大小,进行了正交实验分析,每个因素选用 3 个水平,实验设计见表 1。

以垃圾渗滤液氨氮去除率为指标,按  $L_9(3^4)$  安排实验,对试验数据分别进行直观分析和方差分析,实验结果见表 2~表 4。由表 2 可知,  $R_2 > R_1 > R_3 > R_4$ ,  $K_{A3} > K_{A2} > K_{A1}$ ,  $K_{B3} > K_{B2} > K_{B1}$ ,

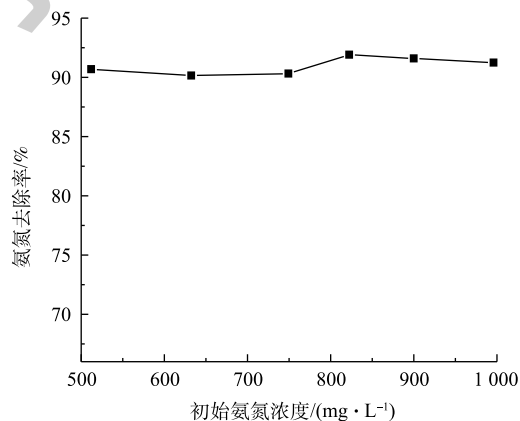


图6 初始氨氮浓度对氨氮吹脱效能的影响

Fig. 6 Variation of ammonia nitrogen stripping efficiency with initial concentration

表1 正交实验设计

Table 1 Design of orthogonal test

序号	pH	温度/°C	气液比	进水氨氮浓度/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
1	10.0	20.0	29	500
2	10.5	25.0	129	700
3	11.0	30.0	225	900

表 2 正交实验直观分析

Table 2 Range analysis of orthogonal test scheme

序号	pH	温度/°C	气液比	进水氨氮浓/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮去除率/%
1	10.0	20.0	29	500	80.26
2	10.0	25.0	129	700	85.62
3	10.0	30.0	225	900	94.62
4	10.5	20.0	129	900	84.17
5	10.5	25.0	225	500	92.36
6	10.5	30.0	29	700	91.06
7	11.0	20.0	225	700	88.68
8	11.0	25.0	29	900	90.86
9	11.0	30.0	129	500	95.58
$K_1$	260.50	253.11	262.18	268.20	
$K_2$	267.59	268.84	265.37	265.36	
$K_3$	275.12	281.26	275.66	269.65	
$R$	14.62	28.15	13.48	4.29	

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of analysis of variance

序号	因素				氨氮去除率/%		区组总值	区组平均值
	(A)pH	(B)温度/°C	(C)气液比	(D)进水氨氮浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	区组1	区组2		
1	10.0	20	29	500	80.26	80.62	160.88	80.44
2	10.0	25	129	700	85.62	85.46	171.08	85.54
3	10.0	30	225	900	94.62	95.10	189.72	94.86
4	10.5	20	129	900	84.17	85.24	169.41	84.71
5	10.5	25	225	500	92.36	93.43	185.79	92.90
6	10.5	30	29	700	91.06	90.34	181.40	90.70
7	11.0	20	225	700	88.68	89.32	178.00	89.00
8	11.0	25	29	900	90.86	90.63	181.49	90.75
9	11.0	30	129	500	95.58	95.81	191.39	95.70
$T_1$	521.68	508.29	523.77	538.06	803.21	805.95	1 609.16	
$T_2$	536.60	538.36	531.88	530.48				
$T_3$	550.88	562.51	553.51	540.62				
$\bar{X}_1$	86.95	84.72	87.30	89.68				
$\bar{X}_2$	89.43	89.73	88.65	88.41				
$\bar{X}_3$	91.81	93.75	92.25	90.10				

$K_{C_3} > K_{C_2} > K_{C_1}$  表明氨氮的吹脱效果在一定条件下是随着 pH、温度和吹脱时间的增大而变大, 与氨氮进水浓度关系不大。为进一步确定不同因素对氨氮去除率影响的显著程度, 对实验数据进行了方差分析。因  $F$  检验需要计算误差偏差平方和以及自由度, 在进行方差分析时所选正交表应留出一定空列。本实验为 4 因素 3 水平实验无空列, 采用重复实验来估计实验误差, 实验方案及实验结果见表 3。对实验结果进行方差分析, 列于表 4。 $F$  检验结果表明, pH(A)、温度 (B)、气液比

表4 正交实验资料的方差分析表  
Table 4 ANOVA table for orthogonal test data

变异来源	平方和	自由度	均方差	F值	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	显著水平
A	71.06	2	35.53	197.40	4.10	7.55	显著
B	245.96	2	122.98	683.22			显著
C	78.78	2	39.39	218.84			显著
D	9.27	2	4.63	25.75			显著
区组	0.42	1	0.42	2.33	4.96	10.10	不显著
误差	1.44	8	0.18				
总和	406.93	17	203.14				

(C)3 因素对氨氮去除率都有极显著影响；进水氨氮浓度 (D) 相对其他 3 因素对氨氮去除率影响不显著，区组间差异不显著，且温度 (B) 影响显著性 > 气液比 (C) > pH (A)。综合直观分析和方差分析得出，此实验设计的最优组合为  $A_3B_3C_3$ 。而实际工程中氨氮吹脱往往受到运行成本、投药量、环境等因素的影响，限制了最优吹脱条件的选择。若将原水氨氮浓度降低到  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以下，再进入后续生化处理系统，对于生化处理系统中的菌群来讲，此浓度既不超过菌群自身的处理能力，反之还可为反硝化过程提供一定的氮源。综合考虑，垃圾渗滤液吹脱较适宜的条件为  $\text{pH}=10.5$ ，温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，气液比为 129。由表 3 可知，在此条件下，氨氮吹脱率介于  $84.17\% \sim 95.81\%$ ，而对应的剩余氨氮浓度为  $20.95 \sim 142.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此可知，对垃圾渗滤液进行吹脱处理，可以实现高效生物脱氮，大幅度减轻后续生物处理负担。

## 2.7 吹脱过程氮素的变化

由图 7 可知，垃圾渗滤液中氨氮占 TN 80% 左右，硝态氮占 TN 2.09%、亚硝态氮占 0.11%；在动力波吹脱 5 h 后，氨氮的浓度显著下降，而  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  和  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  的浓度基本不发生变化，说明吹脱过程主要是去除氨氮，对硝态氮和亚硝态氮的去除效果不明显。

## 2.8 动力波吹脱氨氮实验处理效率与传统吹脱法对比及机理分析

由表 5 可知，在氨氮去除率达到 90% 以上时，传统吹脱所耗时间久、气液体积比大、pH 一般控制在 11 左右，且处理水量较小。而本研究所采用的动力波吹脱技术，在 pH 为 10.5，温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ，气液比为 129 时，一次吹脱 42 L 的废水，可达到 91.25%，表现出极大的优势。

对传统吹脱和动力波吹脱进行对比分析，结果见图 8。已有研究<sup>[32]</sup>表明，吹脱过程中形成气泡尺寸、上升速度和局部含气量等都会影响液相与气相之间的传质，从而响应氨分离效率。对传统吹脱而言，废水一般从上部进入，空气由底部鼓入，塔内可添加填料，最终吹脱出的气体从塔的顶部排出，从吹脱塔的底部往上，气泡的大小迅速增加，此时空气与水比表面积随气泡尺寸的增大而减小，因存在从小到大气泡的压差，当气泡到达液相表面时，它们会因为内部压差而破裂，无法进一步随气流上升排出游离氨，这也是为什么  $\text{NH}_3$  在较大气泡中的传质速度较慢的原

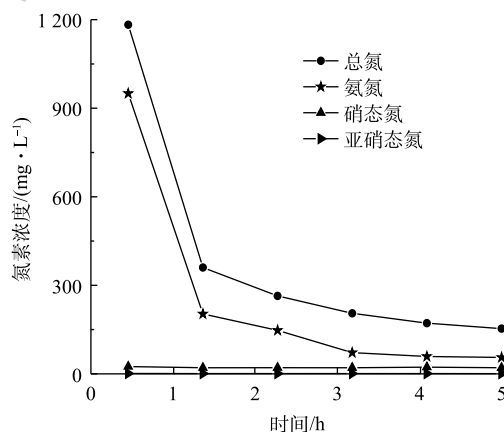


图7 吹脱过程中氮素的变化

Fig. 7 Nitrogen change during stripping

表 5 动力波吹脱氨氮实验处理效率与传统吹脱法对比

Table 5 Comparison of dynamic wave stripping efficiency and traditional stripping

来源	年份	pH	温度/°C	气液比	时间/h	处理量/L	氨氮初始浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮去除率/%
梁良等 <sup>[20]</sup>	2018	7.9	35.0	2 500	10	20	1 500~1 800	43.37
陈建 <sup>[21]</sup>	2012	10.5	20.0	4 000			1 800~2 300	94.00
吴方同等 <sup>[22]</sup>	2001	10.5~11.0	25.0	2 900~3 600	5	20	1 500~2 500	95.00
沈耀良等 <sup>[23]</sup>	2000	11.0	22.5	666	5		2 300	82.50
吴家前等 <sup>[24]</sup>	2010	11.0	25.0	2 000~2 500	2.5	5	900~1 600	90.00
傅金祥等 <sup>[25]</sup>	2011	11.0	40.0	360	1	0.5	1 000	87.47
MARTTINEN等 <sup>[26]</sup>	2002	11.0	20.0	1 000	24	10	1 000	89.00
代晋国等 <sup>[27]</sup>	2011	10.5~11.0	25.0	3 000~3 800	5	5	1 500~2 000	90.00
倪佩兰等 <sup>[28]</sup>	2001	11.0	30.0	2 347			800~1 500	90.00
张萍等 <sup>[29]</sup>	2007	11.0	22.0		1		700	79.70
陈石等 <sup>[30]</sup>	2000	10.8	20.0	5 000~6 000				80.00
刘文龙等 <sup>[31]</sup>	2008	11.5	80.0	300	2	0.2	4 300	99.20
本研究	2020	10.5	10.0	129	5	42	986.58	74.00
本研究	2020	10.5	25.0	129	5	42	995.97	91.25
本研究	2020	10.5	30.0	129	5	42	528.26	94.55

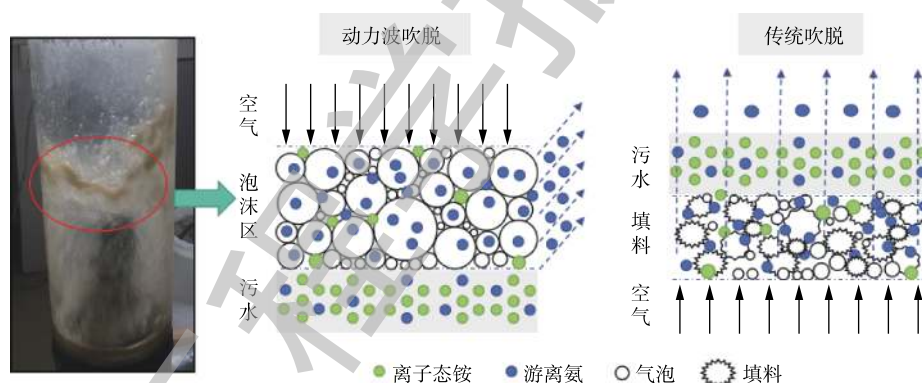


图 8 动力波吹脱与传统吹脱的原理对比

Fig. 8 Comparison of the principle of dynamic wave stripping and traditional stripping

因。对于动力波吹脱而言，装置由上而下进气，液相由下往上射出，装置中特制喷头起到关键作用，喷头逆向喷射出污水与气相高速逆向对撞，当气相与液相达到动量平衡时，动力波吹脱波管中会形成一个高度湍动的泡沫区，在该区域内气液两相呈高速湍流接触，一方面泡沫层的大量气泡可增加气液两相的接触，另一方面高速流动的气液两相相互挤压使气泡破裂，使气液两相得以分离，由此在泡沫层有极高的更新频率，极大强化了气液两相间的反应，从而使动力波吹脱装置具有良好的传质和分离效率。垃圾渗滤液中存在大量的悬浮物，废水在传统吹脱池和填料塔中的流速较慢，随着时间的推移容易停滞积累结垢，出现堵塔现象，而动力波吹脱高速流动的气液两相碰撞形成泡沫区，气液两相不断迅速更新，不易发生结垢现象。

### 3 结论

1) 中试实验结果表明，前 3 h 为吹脱的高效段，故吹脱 5 h 比较经济合理。pH 增加对吹脱有



利, 而 pH 为 10.5 左右时最经济。本研究采用的动力波吹脱技术适用温度范围广, 即使在低温下 (10 ℃) 也能有较高的吹脱去除率。气液比增加能提高吹脱效率, 从节省能耗的角度考虑, 气液比为 129 比较合理; 氨氮浓度对吹脱去除率的影响较小。

2) 正交实验结果表明, 在动力波吹脱过程中不同因素的影响不同 (温度>气液比>pH), 垃圾渗滤液初始氨氮浓度对吹脱效率影响不大。经正交实验优化得到最佳工艺条件为: 温度 25 ℃, pH=10.5, 气液比 129, 吹脱时间 5 h。此时可达较高的去除率, 约 91.25%~94.15%, 同时也能降低投药量。

3) 动力波吹脱所产生的泡沫区, 气液接触界面不断迅速更新, 克服了传统吹脱法受温度和结垢等多种不利因素的限制, 实现了高效脱氨。

4) 本研究采用的动力波吹脱技术, 相较于传统的吹脱法具有占地面积小、投药量更低、不易结垢、低温也能稳定运行等明显的优势, 能为老龄化填埋场设计改造提供指导和参考, 具有十分广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] RENO S, GIVAUDAN J G, POULAIN S, et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(3): 468-493.
- [2] JUNG C, DENG Y, ZHAO R, et al. Chemical oxidation for mitigation of UV-quenching substances (UVQS) from municipal landfill leachate: Fenton process versus ozonation[J]. *Water Research*, 2017, 108: 260-270.
- [3] DENG Y, ENGLEHARDT J D. Treatment of landfill leachate by the Fenton process[J]. *Water Research*, 2006, 40(20): 3683-3694.
- [4] OULEGO P, COLLADO S, LACA A, et al. Impact of leachate composition on the advanced oxidation treatment[J]. *Water Research*, 2016, 88: 389-402.
- [5] LOGANATHAN P, VIGNESWARAN S, KANDASAMY J. Enhanced removal of nitrate from water using surface modification of adsorbents: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 131: 363-374.
- [6] REIS P M, MARTINS P J M, MARTINS R C, et al. Integrating Fenton's process and ion exchange for olive mill wastewater treatment and iron recovery[J]. *Environmental Technology*, 2018, 39(3): 308-316.
- [7] 宋卫锋, 骆定法, 王孝武, 等. 折点氯化法处理高 $\text{NH}_3\text{-N}$ 含钴废水试验与工程实践[J]. *环境工程*, 2006, 24(5): 12-13.
- [8] XIU-FEN L, BARNES D, JIAN C. Performance of struvite precipitation during pretreatment of raw landfill leachate and its biological validation[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2011, 9(1): 71-75.
- [9] 徐峰, 黄海, 杨勇, 等. 挥发性有机物污染地下水吹脱处理的中小试研究[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(4): 457-462.
- [10] OZTURK I, ALTINBAS M, KOYUNCU I, et al. Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates[J]. *Waste Management*, 2003, 23(5): 441-446.
- [11] AHMED F N, LAN C Q. Treatment of landfill leachate using membrane bioreactors: A review[J]. *Desalination*, 2012, 287: 41-54.

- [12] 李秋萍, 邵国兴, 程建伟. 湿式动力波洗涤器的工业应用[J]. *化工装备技术*, 2006(1): 17-20.
- [13] 国家环境保护总局, 中国国家标准化管理委员会. 水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法: HJ/T 399-2007[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008.
- [14] 国家环境保护总局, 中国国家标准化管理委员会. 水质 五日生化需氧量(BOD<sub>5</sub>)的测定 稀释与接种法: HJ 505-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [15] 国家环境保护总局, 中国国家标准化管理委员会. 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法: HJ 636-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [16] 国家环境保护总局, 中国国家标准化管理委员会. 水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 535-2009[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [17] FERRAZ F M, POVINELLI J, VIEIRA E M. Ammonia removal from landfill leachate by air stripping and absorption[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(13/14): 2317-2326.
- [18] LI A F, NING Y Y, XU W J, et al. Air stripping of ammoniacal nitrogen from fecal sewage using a fluidized bed[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 926-930: 4209-4213.
- [19] 吴永明, 万金保, 熊继海, 等. 游离氨在高含氮废水生物法处理中的作用及其研究进展[J]. *工业水处理*, 2010, 30(9): 1-4.
- [20] 梁良, 王丹, 文嘉, 等. 氨吹脱工艺预处理垃圾渗滤液的试验研究[J]. *中国标准化*, 2018(18): 213-214.
- [21] 陈建. 吹脱法处理垃圾渗滤液中高浓度氨氮的主要影响因素[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(4): 128-131.
- [22] 吴方同, 苏秋霞, 孟了, 等. 吹脱法去除城市垃圾填埋场渗滤液中的氨氮[J]. *给水排水*, 2001, 27(6): 20-24.
- [23] 沈耀良, 张建平, 王惠民. 苏州七子山垃圾填埋场渗滤液水质变化及处理工艺方案研究[J]. *给水排水*, 2000, 26(5): 22-26.
- [24] 吴家前, 张健, 李英花. 空气吹脱法在生活垃圾渗滤液氨氮脱除中的实验研究[J]. *广西科学*, 2010, 17(3): 274-276.
- [25] 傅金祥, 张荣新, 范旭, 等. 吹脱法去除垃圾渗滤液中氨氮[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(4): 741-745.
- [26] MARTTINEN S K, KETTUNEN R H, SORMUNEN K M, et al. Screening of physical-chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates[J]. *Chemosphere*, 2002, 46(6): 851-858.
- [27] 代晋国, 宋乾武, 吴琪, 等. 垃圾渗滤液中氨氮去除技术评价及应用[J]. *中国环保产业*, 2011(8): 21-25.
- [28] 倪佩兰, 郑学娟, 徐月恩, 等. 垃圾填埋渗滤液氨氮的吹脱处理工艺技术研究[J]. *环境卫生工程*, 2001, 9(3): 133-135.
- [29] 张萍, 刘强. 生活垃圾卫生填埋场渗沥液脱氮处理技术[J]. *环境卫生工程*, 2007, 15(1): 28-31.
- [30] 陈石, 王克虹, 孟了, 等. 城市生活垃圾填埋场渗滤液处理中试研究[J]. *给水排水*, 2000, 26(10): 15-18.
- [31] 刘文龙, 钱仁渊, 包宗宏. 吹脱法处理高浓度氨氮废水[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(4): 56-59.
- [32] WANG T F, WANG J F, YANG W G, et al. Bubble behavior in gas-liquid-solid three-phase circulating fluidized beds[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2001, 84(3): 397-404.

(本文编辑: 靳炜, 郑晓梅)

## Separation of high concentration ammonia nitrogen from aged-landfill leachate by pilot-scale dynamic wave stripping

JIANG Zhuwu<sup>1,\*</sup>, WANG Sheng<sup>1</sup>, WEI Zhongqing<sup>2</sup>, XIAO Yougan<sup>2</sup>, LI Lin<sup>2</sup>, YAN Lihong<sup>1</sup>, CHEN Lihong<sup>1</sup>, PEI Yanyan<sup>1</sup>

1. College of Ecological Environment and Urban Construction, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China

2. Fuzhou City Construction Design and Research Institute Co. Ltd., Fuzhou 350118, China

\*Corresponding author, E-mail: jiangzhuwu@126.com

**Abstract** In order to solve the difficult problems of denitrification from aged-landfill leachate, a pilot experiment on stripping of ammonia from aged-landfill leachate was carried out by dynamic wave stripping technology. In this study, the effects of stripping time, pH, gas-liquid ratio, temperature and concentration of influent ammonia nitrogen concentration on stripping efficiency were investigated. The results of the single factor experiment showed that the stripping removal rate increased rapidly in the first 3 hours, and changed little after 5 hours. The proportion of free ammonia increased at high pH, which was more beneficial for stripping, and the most economical stripping result occurred a pH of around 10.5. The applicable temperature range of dynamic wave stripping was wide, the removal efficiencies could reach 72.62% and 90.68% at 10 °C and 25 °C, respectively. The stripping efficiency could be improved by increasing the gas-liquid ratio, but when it was above 129, the insignificant increase of gas-liquid specific stripping effect occurred. The concentration of influent ammonia nitrogen concentration within the examined range had slight effect on ammonia stripping. The results of orthogonal test demonstrated that the temperature variance was the largest, the variances of pH and gas-liquid ratio were the second, and the variance of influent ammonia nitrogen concentration was the smallest. Therefore, the most influence factor on stripping was temperature, then the second ones were pH and gas-liquid ratio, and the final one was initial ammonia nitrogen concentration. Compared with traditional stripping process, the optimum conditions of stripping process were 25 °C, pH 10.5, gas-liquid ratio of 129 and stripping time of 5 h, and the corresponding total removal rate of ammonia nitrogen could reach 91.25%~94.15% with enhanced separation efficiency of ammonia nitrogen.

**Keywords** aged-landfill leachate; ammonia nitrogen; denitrification; dynamic wave; stripping